

# 测量土壤质量含水率的体积置换方法\*

马玉莹 雷廷武 张心平

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 提出了一种直接测量土壤质量含水率的方法,达到传统干燥称重法同等的效果。该方法将任意待测土样置于已知体积的容器中并将容器注满水,由已经测量得到的湿润土壤的质量、容器中盛满水后土样与水的总质量、假设已知的土壤颗粒密度和水密度,计算得到土壤质量含水率。给出了相应的测量方法、测量过程、土壤含水率计算过程。采用4种土壤,配制成10%、15%、20%、25%、30%的初始土壤体积含水率。用提出的体积置换法测得土壤质量含水率后,再将土样干燥,得到传统干燥法测量的土壤质量含水率。将两种方法测量的结果进行比较,说明所提方法的可行性。结果表明提出的方法较传统干燥8h后称质量法测量的含水率高2.4%~2.7%。而传统方法延长干燥时间后,测量得到的含水率约增加1%~3%。表明所提方法测量过程优于传统方法。

**关键词:** 土壤 质量含水率 体积置换 测量方法

**中图分类号:** S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)12-0148-06

## Direct Measurement Method of Soil Moisture by Volume Replacement

Ma Yuying Lei Tingwu Zhang Xinping

(College of Hydraulic and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** This article presented a method for direct measurement of soil moisture, which was equivalent to the conventional oven-dry method. Under assumed soil particle density, soil samples for measurement were placed into a container of known volume, and then the container was filled with water to saturated. The weights before and after saturation of the soil sample, the assumed soil particle density and water density, were used to estimate the original soil moisture content. The measurement method, procedures as well as the computational method and procedures were detailed. Four soils were used for the validation experiments, under five initial soil water contents 10%, 15%, 20%, 25% and 30%. The measured results were compared with those measured by the oven-dry method. The data showed that the measured moisture contents by the new method were about 2.4% ~ 2.7% higher than those by the traditional method after oven-dry for 8 h. Extended oven-dry for 12 to 48 h produced 1% ~ 3% higher water content than dried for 8 h. The proposed method performs better than the conventional method. The results indicate the feasibility of the new method.

**Key words:** Soil Water content Volume replacement Measurement method

### 引言

土壤水制约养分和溶质在土壤中的溶解、转移,进而影响土壤肥力和土壤性质,影响微生物的活动<sup>[1]</sup>,也是生态系统中植被生长和退化生态系统中

植被恢复的主要影响因素。土壤剖面中土壤含水率分布是表征一定深度土层干湿程度的物理量,是陆地植物生长的一项重要参数。土壤水分测定是土壤水分管理的基础,准确地获取土壤含水率信息极为重要<sup>[2-3]</sup>。

收稿日期: 2012-11-30 修回日期: 2013-03-12

\* 国家自然科学基金重点资助项目(40635027)

作者简介: 马玉莹, 博士生, 主要从事水文学及水资源研究, E-mail: myuying2010@163.com

通讯作者: 雷廷武, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀和旱地农业研究, E-mail: leitingwu@cau.edu.cn

测量土壤水分可采用多种仪器和方法, 它们的工作原理、测量精度、使用范围、方法和成本等均存在着很大差异。长期以来, 干燥称质量法一直是标定所有其他间接测量仪器的基础, 也是一种长期存在的实验室测量含水率方法<sup>[4]</sup>, 为其他所有测量仪器, 如时域反射仪法、伽马射线法、驻波法、中子仪、电阻/电容传感仪、近红外反射法等<sup>[5-23]</sup> 提供校准的基础。

传统测量含水率的干燥法比较费时。干燥法测量的基础是干燥土样, 理论上就是要将土样干燥到质量恒定不变为止, 此时认定土壤完全干燥。土壤的质地不同, 彻底干燥时间长短有很大差异。理论上质地细的土样需干燥无限长的时间才能完全干燥, 这在实际中是很难实现的。而且, 不同的土样完全干燥的时间存在差异, 很难为普通使用者应用。完全干燥的土样在冷却过程中又会吸收空气中的水分, 土样又处于非完全干燥的状态。为了建立统一的指标, 国家土工测量标准规定, 干燥称质量法要求将土样在 105℃ 条件下干燥 8 ~ 12 h。干燥 8 ~ 12 h 对于质地较黏性的土壤来说, 待测土样中仍有相当多的水分残留, 因而测得的含水率存在一定的误差。除此之外, 干燥称质量法还需要干燥箱及电源, 消耗能源且不适合野外作业。干燥过程需要花费一定的时间, 在一些需要立即得到测量结果的场合使用受到限制。在一些工程实践中, 为了即时测量得到土壤含水率, 常采用酒精燃烧法, 作为干燥称质量法的替代方法。采用这种方法往往需要搅拌土样、反复多次燃烧土样, 耗时耗能, 且容易在搅拌的过程中掉落土粒, 并且不能保证完全烧干土壤中的水分, 从而引起测量误差。本文阐述一种用体积置换的方法测量土壤质量含水率的方法。

## 1 测量原理与计算方法

湿润土壤是由土壤颗粒、土壤水和气体组成的三相混合物。土壤质量主要由土壤颗粒质量和水分质量决定, 空气所占的质量很小, 在试验计算中可以忽略不计。而土壤颗粒和其中所含水分的质量可以通过称质量确定。土样质量为土壤颗粒质量和土壤水质量之和, 土样初始体积为土壤颗粒体积、土壤水体积以及土中空气体积之和。计算公式如下

$$v = v_s + v_w + v_a \quad (1)$$

$$m = m_s + m_w \quad (2)$$

式中  $v$ ——初始土样的体积,  $\text{cm}^3$

$m$ ——测量土样的初始质量,  $\text{g}$

$v_w$ ——土壤水体积,  $\text{cm}^3$

$m_w$ ——土壤水质量,  $\text{g}$

$v_s$ ——土壤颗粒体积,  $\text{cm}^3$

$m_s$ ——土壤颗粒质量,  $\text{g}$

$v_a$ ——气体体积,  $\text{cm}^3$

用一个体积和质量已知的容器, 装入一定量(任意)的待测含水率的土壤, 测量得到湿土的质量。根据质量、体积、密度关系, 式(2)变为

$$m = \rho_s v_s + \rho_w v_w \quad (3)$$

式中  $\rho_s$ ——土壤颗粒密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$

$\rho_w$ ——水的密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$

土壤颗粒密度与土壤的化学与矿物组成有关, 一般土壤颗粒密度为 2.6 ~ 2.8  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。细粒土(黏性土)一般为 2.70 ~ 2.75  $\text{g}/\text{cm}^3$ , 砂土一般在 2.65  $\text{g}/\text{cm}^3$  左右<sup>[24]</sup>。计算时通常采用的土壤颗粒密度为 2.65  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。在标准大气压下, 当试验温度为室温时, 水密度约为 1.0  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。在本试验中设定常规土壤颗粒密度为 2.653  $\text{g}/\text{cm}^3$ , 水的密度为 1.0  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

将装有土样的容器注满水, 称量得到加满水后容器内土样与水的总质量为  $m'$ , 此时, 容器中物质的质量包括土壤颗粒(无水分)质量、土壤水质量以及补充水分的质量之和, 则质量关系表达式为

$$m' = m_s + m_w + m_r \quad (4)$$

式中  $m_r$ ——补充的水分质量,  $\text{g}$

向土样中注水的过程是将土样和容器中的气体置换出来, 使得土样浸没在水中。补充水分的质量已知, 原有的充气空隙即为注入的水置换的体积。给定任意固定容器的体积  $v'$  ( $\text{cm}^3$ ), 根据体积关系, 可以计算得到土壤水和土壤颗粒的体积之和, 为容器的体积与补充水分的体积之差, 即

$$v_s + v_w = v' - m_r / \rho_w \quad (5)$$

联立式(3)和(5), 求出土壤颗粒体积和土壤水的体积

$$v_s = \frac{m - \rho_w v_0}{\rho_s - \rho_w} \quad (6)$$

$$v_w = \frac{\rho_s v_0 - m}{\rho_s - \rho_w} \quad (7)$$

其中

$$v_0 = v' - \frac{m_r}{\rho_w} \quad (8)$$

式中  $v_0$ ——土壤颗粒与土壤水的体积,  $\text{cm}^3$

根据定义, 土壤质量含水率为

$$\theta = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% \quad (9)$$

即

$$\theta = \frac{v_w \rho_w}{v_s \rho_s} \times 100\% \quad (10)$$

## 2 试验材料与方法

试验装置系统主要包括体积已知的容器和天

平。天平精度为 0.1 g,当盛土容器容积为 100 cm<sup>3</sup> 时,含水率测量精度可达 1/1 000。试验装置如图 1 所示。

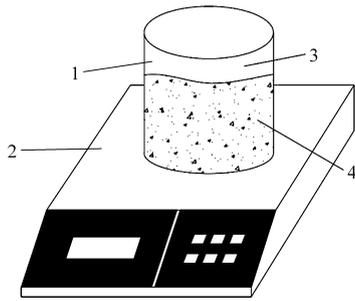


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Experimental device

1. 容器 2. 电子秤 3. 水 4. 土壤颗粒

试验采用 4 种土壤材料,分别为采自陕西杨凌黏黄土、北京粉壤土、江西黏红土和吉林黑土。各种土壤的颗粒组成如表 1 所示。土壤质量含水率测量试验在中国农业大学土力学实验室进行,温度为室温。

表 1 试验土壤颗粒组成

Tab. 1 Soil particle size distributions %

土壤	黏粒 ( < 0.002 mm )	粉粒 ( 0.002 ~ 0.05 mm )	砂粒 ( 0.05 ~ 1 mm )
黏黄土	31.80	62.80	5.40
粉壤土	16.75	53.00	30.25
黏红土	47.60	45.00	7.40
黑土	12.00	86.78	1.22

试验土样采用 5 种设计含水率:10%、15%、20%、25%、30%。按照一定水量和风干土(含水率 1%~3%)质量进行配比预制。土壤设计含水率的预制过程参照文献[25]。选取最大设计含水率 30% 的原因是,正常情况下一般田间土壤的最大可能含水率为田间持水量,对于所用类型的土壤约为 30%,因此试验中预配制的最大土壤含水率近似为田间实际可能达到的最大含水率。而大于田间持水量的非饱和土壤的含水率是不稳定的,会因为土壤排水使得土壤含水率无法控制,也无法达到均匀与稳定。

用体积置换法进行含水率测量过程为,取若干(任意质量或体积的)配制好的不同含水率的土壤样品,装入已知体积的容器内,称出土样的质量。而后再将容器缓慢注满水,注水时为了使土样内的空气顺利排出,在注水过程中用细小玻璃棒不断搅拌土样。当注入的水位接近容器上沿时,用滴管向容器继续缓慢逐滴加水,直到液面略高于容器上沿,再在容器上方加盖玻璃板,消除表面张力产生的水的体积误差,保证土壤颗粒和水恰好共同充满容器的空

间。此时容器被土壤颗粒与水充满,待测土样完全浸没在水中,达到充分饱和状态,即注入的水将原来存在于土样和容器中的空气全部置换出来。随后称量土样、水与容器的总质量,每种土样不同含水率的各种重复都按照此程序进行操作。称得充满水的盛土容器后,即可计算得到土壤质量含水率。

将称量后的土样静置一段时间,待容器中的上层浑浊液体变为清澈后,即细小的土壤颗粒已全部沉淀到容器底部时,将上层清澈水缓慢倒出,把余下的土水混合物置于烘箱中干燥。用干燥称质量法测量出干土质量,计算得到传统法测量的土壤质量含水率。每种土壤的每种含水率用这两种方法分别重复测量 3~4 次,取测量结果的平均值。

### 3 结果与分析

将体积置换法测量得到的质量含水率与传统干燥称质量法测量得到的结果进行对比,并用式(11)进行拟合,测量结果如图 2 所示。

$$y = Bx + A \quad (11)$$

式中  $y$ ——体积置换法测得的土壤质量含水率,%  
 $A$ 、 $B$ ——回归系数

$x$ ——传统干燥称质量法测得的土壤质量含水率,%

由图 2 可看出,对于每种土壤,拟合参数  $B$  值均很接近 1,说明用体积置换法测得的土壤质量含水率与传统干燥称质量法得出的结果具有较好的一一对应关系,说明了这种测量方法的合理性。同时,参数  $A$  都大于零,说明由该方法测得的土壤质量含水率大于由传统干燥法测得的结果。不同土壤用体积置换方法得到的含水率比干燥 8 h 得到的结果大 2.4%~2.7%。可能的原因是,用传统干燥称质量法在干燥 8 h 后,根据土壤质地不同,土样中可能仍有水分残留。根据土工测量规范,传统方法干燥 8~12 h 后便停止,不同质地土壤仍有不同数量的水分残留,所产生的这部分不确定性误差往往被忽略,导致测得的含水率比真实含水率值偏小。

为了说明残留水分随干燥过程变化导致对测量含水率的影响,取初始含水率为 25%~30% 的 4 种土样进行不同时长干燥,确定干燥过程长短对测量误差的影响。取每种土样样品各 3 个,将它们干燥 8、12、24、48 h 后称量,进而计算得到含水率随干燥时间增加的变化过程。测得的含水率为 3 次重复试验的平均值。

计算干燥 8、12、24、48 h 后土壤质量含水率为

$$\theta_i = \frac{m_0 - m_i}{m_i} \times 100\% \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (12)$$

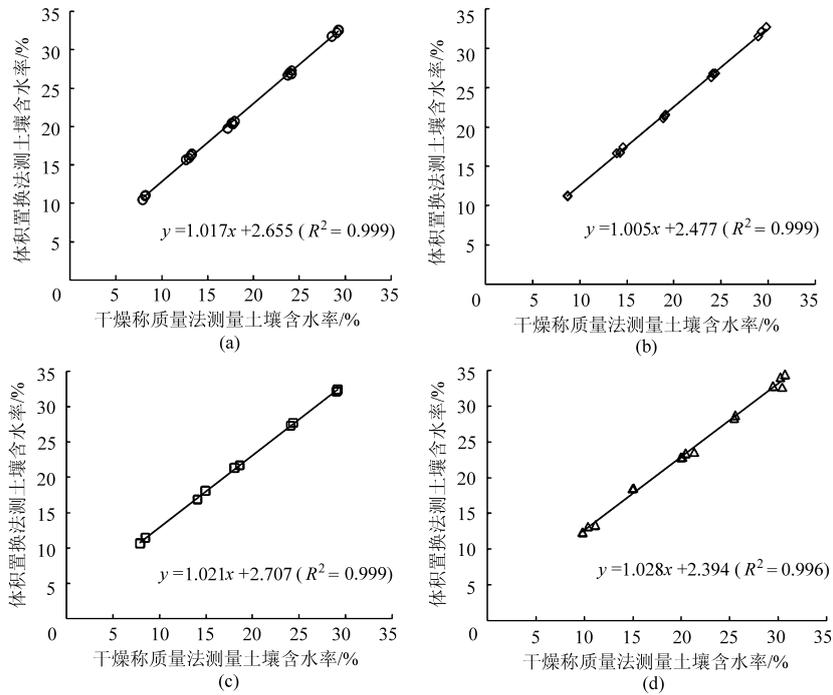


图 2 体积置换法与干燥称质量法测得的土壤质量含水率对比

Fig. 2 Soil moisture measured by volume replacement and by oven-dry method

(a) 陕西杨凌黏黄土 (b) 北京粉壤土 (c) 江西黏红土 (d) 吉林黑土

计算土样质量含水率在每个时段的增量

$$\Delta\theta = \theta_{i+1} - \theta_i \quad (13)$$

式中  $\theta_1$ ——干燥 8 h 后土壤质量含水率, %

$m_1$ ——干燥 8 h 后干土质量, g

$\theta_2$ ——干燥 12 h 后土壤质量含水率, %

$m_2$ ——干燥 12 h 后干土质量, g

$\theta_3$ ——干燥 24 h 后土壤质量含水率, %

$m_3$ ——干燥 24 h 后干土质量, g

$\theta_4$ ——干燥 48 h 后土壤质量含水率, %

$m_4$ ——干燥 48 h 后干土质量, g

$\Delta\theta$ ——相邻两个时刻含水率的差值, %

$m_0$ ——土样初始质量, g

土样干燥 8 h 后测得的含水率及干燥 12、24、48 h 后土壤含水率的累加增量如表 2 所示。

水率变化越大,表明黏粒含量高的土壤需要较长的干燥时间才能将土样中的水分完全干燥。将各土样随着干燥时间的增加所计算得到的土壤质量含水率,与土样的干燥时间按照式(14)进行拟合,得到的拟合曲线变化趋势如图 3 所示。

$$y = Ax^2 + Bx + C \quad (14)$$

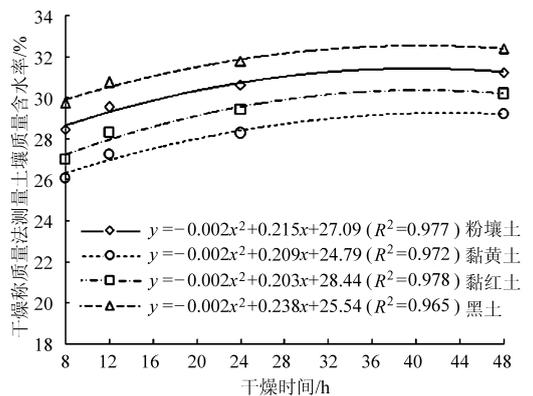


图 3 4 种土样随干燥时间延长测得土壤质量含水率的变化趋势

Fig. 3 Changes in measured soil moistures of 4 soil samples with prolonged drying time

对于每一种土样,用传统称质量方法干燥 48 h 后计算得到的土壤质量含水率与体积置换方法测得的结果进行比较,最大绝对误差在 1.5% 左右,结果如表 3 所示。

根据体积置换法的测量原理可知,由该方法得到的土壤质量含水率比干燥法测量的结果偏大,而由前述分析,传统干燥称质量法在干燥 8 h 后计算

表 2 干燥 8 h 后测得的土样含水率与随干燥时间延长的累积增量

Tab. 2 Water content by drying 8 h and cumulative increment with prolonged drying time %

土壤	土壤干燥时间/h			
	8	12	24	48
粉壤土	28.48	28.48 + 1.05	28.48 + 2.17	28.48 + 2.80
黏黄土	26.11	26.11 + 1.15	26.11 + 2.21	26.11 + 3.10
黏红土	27.02	27.02 + 1.30	27.02 + 2.22	27.02 + 3.12
黑土	29.75	29.75 + 1.11	29.75 + 2.10	29.75 + 2.67

试验数据表明,随着干燥时间的增加,土壤含水率仍有 1% ~ 3% 的增加。黏粒含量越高的土壤,含

表3 体积置换法与干燥法测量含水率比较的绝对误差

Tab.3 Errors in measured soil moistures by new method and traditional method %

含水率/%	陕西杨凌 黏黄土	北京 粉壤土	江西 黏红土	吉林 黑土
10	0.982	1.584	1.190	1.510
15	1.596	1.628	0.986	1.402
20	1.570	1.221	1.404	1.549
25	0.995	1.350	1.113	1.156
30	1.563	1.464	1.043	1.316

得到的含水率有可能偏小于实际值。土样干燥 48 h 后干土质量几乎稳定不变,体积置换法测得的土壤质量含水率比传统干燥称质量方法测量的含水率高 1% ~ 2%,表明体积置换法测量精度高于传统干燥 8 h 后称质量的方法;同时体积置换法存在的误差可能是由于土壤颗粒密度的取值误差造成的,可以通过修正土壤颗粒密度进一步减少误差,提高测量精度。

## 4 结论

(1) 提出了一种用体积置换的方法来测量土壤质量含水率。叙述了测量方法和测量程序,整个试验通过向装有土样的已知体积的容器中注满水,使土壤颗粒与水充满整个容器,而后称量土壤与水的总质量以及土样初始的质量来确定土壤质量含水率。

(2) 传统方法一般干燥土样 8 ~ 12 h,而在这个时间段里,有些质地的土样并未完全干燥,还有一小部分水残留在其中,所以不同质地的土壤随着干燥时间的增长,含水率的变化约在 1% ~ 3%。

(3) 使用体积置换法测量的土壤质量含水率与传统干燥 48 h 后称质量法测得的结果相比较,最大绝对误差在 1.5% 左右,表明该方法的合理性。该测量方法虽然也存在一些误差,但其操作过程简单,测量消耗的时间远远小于传统干燥称质量方法。

## 参 考 文 献

- 霍洪元,孙淑玉,刘影. 浅谈土壤水分测定技术及土壤水分动态的研究[J]. 水利科技与经济, 2010, 16(2):165 ~ 166.
- 王辉,王金九,邵明安. 前期土壤含水量对坡面产流产沙特性影响的模拟试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5):65 ~ 68.  
Wang Hui, Wang Quanjiu, Shao Ming'an. Simulation experiment of effect of antecedent soil moisture content on characteristics of runoff and sediment from two soil sloping lands[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5):65 ~ 68. (in Chinese)
- 邹文秀,韩晓增,江恒,等. 东北黑土区降水特征及其对土壤水分的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9):196 ~ 202.  
Zou Wenxiu, Han Xiaozeng, Jiang Heng, et al. Characteristics of precipitation in black soil region and response of soil moisture dynamics in Northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9):196 ~ 202. (in Chinese)
- 张学礼,胡振琪,初士立. 土壤含水量测定方法研究进展[J]. 土壤通报, 2005, 36(1):118 ~ 121.  
Zhang Xueli, Hu Zhenqi, Chu Shili. Methods for measuring soil water content: a review[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(1):118 ~ 121. (in Chinese)
- 时新玲,王国栋. 土壤含水量测定方法研究进展[J]. 中国农村水利水电, 2003(10):84 ~ 86.  
Shi Xinling, Wang Guodong. Research advances in measuring method of soil water content [J]. China Rural Water and Hydropower, 2003(10):84 ~ 86. (in Chinese)
- 常冬梅,郭红霞,林东生. 双能  $\gamma$  射线穿透法测量土壤密度和水含量[J]. 核电子学与探测技术, 1998, 18(5):375 ~ 378.  
Chang Dongmei, Guo Hongxia, Lin Dongsheng. Measurement of soil density and water content by attenuation of bi-energy  $\gamma$  rays[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1998, 18(5):375 ~ 378. (in Chinese)
- Fahad A A. A computer controlled dual gamma scanner for measurement of soil water content and bulk density and assessment of its filed performance[J]. International Journal of Radiation Applications and Instrumentation, 1989, 40(4):340 ~ 342.
- 殷哲,雷廷武,董月群. 近红外土壤含水率传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7):73 ~ 77.  
Yin Zhe, Lei Tingwu, Dong Yuequn. Design and experiment of near infrared sensor for soil moisture measurement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7):73 ~ 77. (in Chinese)
- 李小昱,肖武,李培武,等. 基于近红外傅里叶特征提取方法的土壤含水率检测[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5):64 ~ 67.  
Li Xiaoyu, Xiao Wu, Li Peiwu, et al. Near-infrared spectral detection of soil moisture based on feature extraction of FFT[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5):64 ~ 67. (in Chinese)
- 赵燕东,王一鸣. 基于驻波率原理的土壤含水率测量方法[J]. 农业机械学报, 2002, 33(4):109 ~ 111.  
Zhao Yandong, Wang Yiming. Study on the measurement of soil water content based on the principle of standing-wave ratio[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(4):109 ~ 111. (in Chinese)
- 王文焰,张建丰,汪志荣.  $\gamma$  透射法在土壤水运动研究中的应用[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1):95 ~ 98.  
Wang Wenyan, Zhang Jianfeng, Wang Zhirong. Application of gamma-ray in research of soil water movement[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1):95 ~ 98. (in Chinese)
- Noborio K, McInnes K J, Heilman J L. Measurement of soil water content, heat capacity, and thermal conductivity with a single TDR probe[J]. Soil Science, 1996, 161(1):22 ~ 28.
- Persson M, Hardy S. Estimating water content from electrical conductivity measurements with short time-domain reflectometry probes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(2):478 ~ 482.
- Petersen L W, Thomsen A, Moldrup P, et al. High resolution time domain reflectometry: sensitivity dependency on probe-design

- [J]. *Soil Science*, 1995, 160(3): 149.
- 15 周凌云, 陈志雄, 李卫民. TDR 法测定土壤含水量的标定研究[J]. *土壤学报*, 2003, 40(1): 59~64.  
Zhou Lingyun, Chen Zhixiong, Li Weimin. Calibration on measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR) [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(1): 59~64. (in Chinese)
- 16 Deeds N E, McKinney D C, Pope G A, et al. Difluoromethane as partitioning tracer to estimate vadose water saturations [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1999, 125(7): 630~633.
- 17 Brusseau M L, Popovicova J, Silva J A K. Characterizing gas-water interfacial and bulk-water partitioning for transport of gas-phase contaminants in unsaturated porous media [J]. *Environmental Science & Technology*, 1997, 31: 1645~1649.
- 18 Nelson N T, Brusseau M L, Carlson T D. A gas-phase partitioning tracer method for the in situ measurement of soil-water content [J]. *Water Resource Research*, 1999, 35(12): 3699~3707.
- 19 Kim H, Rao P S C, Annable M D. Gaseous tracer technique for estimating air-water interfacial areas and interface mobility [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(6): 1554~1560.
- 20 Carlson T D, Costanza-Robinson M S, Keller J, et al. Intermediate-scale tests of the gas-phase partitioning tracer method for measuring soil-water content [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(2): 483~486.
- 21 韩小平, 王沛华, 崔传金, 等. 土样盒土表特征对近红外光谱测量土壤水分精度的影响 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 47~51.  
Han Xiaoping, Wang Peihua, Cui Chuanjin, et al. Influence of soil surface disposal on precision of measuring soil water by near-infrared spectroscopy [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(6): 47~51. (in Chinese)
- 22 马红章, 柳钦火, 王合顺, 等. 基于微波干涉技术的土壤介电特性测量 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(9): 159~163.  
Ma Hongzhang, Liu Qinhua, Wang Heshun, et al. Soil dielectric characteristic determination based on microwave interferometry theory [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(9): 159~163. (in Chinese)
- 23 施阁, 李青, 孙延伟, 等. 基于边缘电场的电容式土壤含水量监测仪 [J]. *农机化研究*, 2009(11): 86~89.
- 24 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 14~15.
- 25 马玉莹, 雷廷武, 张心平, 等. 体积置换法直接测量土壤质量含水率及土壤容重 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29(9): 86~93.

~~~~~

(上接第 55 页)

- 4 廖庆喜, 高焕文, 舒彩霞. 免耕播种机防堵技术研究现状与发展趋势 [J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 108~112.  
Liao Qingxi, Gao Huanwen, Shu Caixia. Present situations and prospects of anti-blocking technology of no-tillage planter [J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(1): 108~112. (in Chinese)
- 5 赵武云, 张锋伟, 吴劲锋, 等. 免耕播种机弹齿式防堵装置 [J]. *农业机械学报*, 2007, 38(3): 188~190.
- 6 刘应回, 费国胜. 少耕覆盖播种机: 中国, CN01222698. X [P]. 2002-04-10.
- 7 何进, 李洪文, 王庆杰, 等. 动力甩刀式小麦固定垄免耕播种机 [J]. *农业机械学报*, 2011, 42(10): 51~55.  
He Jin, Li Hongwen, Wang Qingjie, et al. Powered hammering blade no-till wheat seeder for permanent raised beds [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(10): 51~55. (in Chinese)
- 8 高焕文, 廖庆喜, 李洪文. 免耕播种机组合型锯切防堵装置: 中国, CN03264397.7 [P]. 2004-08-04.
- 9 张晋国. 带状粉碎免耕播种机的试验研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2001.  
Zhang Jinguo. Study on the strip chopping anti-blocking no-till planter [D]. Beijing: China Agricultural University, 2001. (in Chinese)
- 10 马洪亮. 免耕播种机玉米秸秆根茬切断装置的研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2006.  
Ma Hongliang. Study on the cutting corn stalk and rootstalk device of no-tillage drill [D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 11 张喜瑞. 我国北方一年两熟区小麦免耕播种机防堵装置研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2010.  
Zhang Xirui. Study on anti-blocking mechanism for wheat no-till planter in annual two crops region of China [D]. Beijing: China Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- 12 张喜瑞, 何进, 李洪文, 等. 免耕播种机驱动圆盘防堵单元体的设计与试验 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(9): 117~121.  
Zhang Xirui, He Jin, Li Hongwen, et al. Design and experiment on the driving disc of anti-blocking unit for no-tillage planter [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(9): 117~121. (in Chinese)
- 13 马洪亮, 魏淑艳. 一年两熟地区玉米秸秆根茬处理和小麦免耕作业方式的分析 [J]. *中国农机化*, 2012(1): 60~64.  
Ma Hongliang, Wei Shuyan. Analysis of the dealing with maize residue and the mode of no-till drilling wheat in double-crop regions in north China [J]. *Chinese Agricultural Mechanization*, 2012(1): 60~64. (in Chinese)
- 14 王庆杰, 何进, 李洪文, 等. 免耕播种机开沟防堵单元体设计与试验 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(1): 27~31.  
Wang Qingjie, He Jin, Li Hongwen, et al. Design and experiment on furrowing and anti-blocking unit for no-till planter [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(1): 27~31. (in Chinese)
- 15 王庆杰, 李洪文, 何进, 等. 大垄宽窄行免耕种植对土壤水分和玉米产量的影响 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(8): 39~43.  
Wang Qingjie, Li Hongwen, He Jin, et al. Effects of wide-ridge and narrow-row no-till cultivation on soil water and maize yield [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(8): 39~43. (in Chinese)